



TITLE:

# 木材乾燥に関する研究 第1報

AUTHOR(S):

満久, 崇麿

---

CITATION:

満久, 崇麿. 木材乾燥に関する研究 第1報. 木材研究 : 京都大學木材研究所報告 1951, 6: 51-70

ISSUE DATE:

1951-03

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/52734>

RIGHT:

# 木材乾燥に関する研究

## 第 1 報

満 久 崇 麿

(木材物理第 2 研究室)

Takamaro MAKU : Studies on the Drying of Wood, I.

### 緒 言

木材の熱気乾燥には多くの基礎的問題が関連連している。筆者は先にこの一端として木材の熱伝導特に木材の Steaming について研究し現在尙之に関する実験の一部を継続中であるが、本研究はこれと並行して熱気乾燥中の重要な問題の一つである水分の移動に関して考察せんとしたものである。

木材を熱気乾燥した場合他の一般の固体に於けると同様、それが相当の厚さを有する限り先づ表面附近の水分が熱気によつて持ち去られ、これと共に内部水分が液体又は蒸気の何れかの形で表面へ移動し、然る後に周囲の空气中へ奪い去られることは明である。従つて乾燥の機構は表面蒸発と毛管通導又は拡散の何れか 1 つが主要素となるか或いは之等の 2 又は 3 者が同時に作用することになり、前者は主として乾燥条件に支配されるが後の 2 つに対しては温度、木材組織の粗密、木材内部の水分傾斜、温度傾斜或いは蒸気圧傾斜等が支配的要素となるものとする事が出来る。而して相当に厚い材を対象とする場合表面蒸発に対する抵抗に比して内部移動に対する抵抗が極めて大きい為、少くとも現在の乾燥方法を前提として之を実際的な立場から考える時上記の諸要素の内毛管通導、水分傾斜及び蒸気圧傾斜による水分の移動が支配的となり、従来の研究も専ら之等の問題の解明に対して向けられている事は之又当然といわなければならない。

### I 従 来 の 研 究

乾燥中木材内部の水分の移動がどのようなメカニズムによつてゐるか、又之を如何なる物理的法則に結びつけるかという問題については古くから論ぜられている。以下之に関して筆者が直接又は間接に接し得た論文中主なるものを紹介すると先づ TUTTLE 氏 (1925) は乾燥中の水分の移動が拡散法則に従うものとして熱伝導の式

$$\frac{\partial v}{\partial \theta} = K' \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad \text{--- (1)}$$

$v$  : 含水率

$\theta$  : 乾燥時間

$K'$  : 水分拡散率

x : 拡散方向

を用いて厚さ 5.08cm の Sitka spruce を 51 % から 8 % 迄乾燥した data によると  $K' = 9.05 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/sec (0.029 cm<sup>2</sup>/h) で全乾燥期間中略一定であり、この値を用いて計算した水分傾斜が実際とよく一致したと述べ、次で長沢氏等 (1927) も同様の式を用いて厚さ 3.5cm の各種の含水率のスギ及びマツを 70°C で乾燥し  $K' = 0.0203 \sim 0.0300$  cm<sup>2</sup>/h を出し、SHERWOOD 氏 (1929) は

$$\frac{\partial v}{\partial \theta} = K' \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad \text{--- (2)}$$

v : 単位容積の木材中の水分 g/cm<sup>3</sup>

を用いて 1.27, 1.9cm の popular 板材を 31~35°C, 1.0m/sec の熱気で夫々 49.4, 49.7 % から乾燥し、 $k' = 9.4 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/sec (0.0338 cm<sup>2</sup>/h) を出し TUTTLE 氏の実験値と略一致していると論じている。以上の実験に適用した解は何れも (1), (2) 式に対し乾燥開始直後、木材表面が熱気の平衡含水率に達することを仮定しているが之に対する実験的な裏付けはなく繊維飽和点以下の場合とはともかく繊維飽和点以上の高含水率の場合にかゝる境界条件を無条件に仮定することは首肯し難い所であり、NEWMANN 氏 (1931) はこの欠点を除く為に熱伝導に於ける熱伝達率に相当する表面蒸発係数を用いて減率区間に対する解を求めている。之は要するに減率乾燥の初期に於いて木材表面が熱気の平衡含水率よりも高いある含水率を有する事を意味し、SHERWOOD (1932~33), 亀井 (1937) 両氏も之に類似の境界条件を用いて恒率及び減率第 1 段の解を求めている。之等の理論解を用いて算出した水分傾斜と実際に現われる水分傾斜を比較した例は未だ示されていないが、他の固体乾燥の例から判断すると両者はあまり合致しない様である。尚亀井氏は厚さ 3cm の桧の板材を 30°C, 20 %, 1.42 m/sec の熱気で乾燥し、減率第 2 段に対して  $k'_{av} = 0.01376$  cm<sup>2</sup>/h を求め、更に  $k'$  が温度及び速度の上昇、関係湿度の減少と共に略直線的に増加する事を見出している。

上記の各研究者が直接熱伝導の式を用いているのに対し MARTLEY 氏 (1926) は拡散の式

$$\frac{dW}{dAd\theta} = -k \frac{du}{dx} \quad \text{--- (3)}$$

dW : dθ 時間に面積 dA を通り拡散する水分量 (g)

k : 拡散係数 g/cmh%

$\frac{du}{dx}$  : 水分傾斜  $\frac{\%}{cm}$

を用い、scotspine の定常状態に於ける半径方向の拡散係数を求め、k が繊維飽和点以下に於いても含水率の増加と共に著しく増加する事を認め、松本氏によれば LUDWIG 氏 (1933) も

$$\frac{dW}{dAd\theta} = -k'' \frac{dp}{dx} \quad \text{--- (4)}$$

$k''$  : 拡散係数 g/cmhmmHg

$\frac{dp}{dx}$  : 蒸気圧傾斜 mmHg/cm

を用いて繊維飽和点以下の数種の材につき  $k''$  が温度は勿論含水率の増加に伴い著しく増加するとし、又 EGNER 氏 (1934) は一次元の場合について後出 (8) 式を変形した

$$k = \frac{r_0}{100} \frac{\frac{\partial}{\partial \theta} \int u dx}{\frac{du}{dx}} \quad \text{--- (5)}$$

$r_0$  : 木材の絶乾密度  $g/cm^3$

$u$  : 含水率%

$x$  : 板の中央面からの距離  $cm$

$\theta$  : 乾燥時間  $h$

$k$  : 拡散係数  $g/cmh\%$

を用い Fichte の水分傾斜曲線から graphically に  $k$  を計算し、半径方向に対しては繊維飽和点以下に於いて  $k$  が温度及び含水率の増加に伴い増加すること並に繊維方向に対しては 15 % 附近で 1 つの極大値を有することを認めている。然るに (2) 式の  $v$  が  $g/cm^3$  で表わされておれば  $k' = K'$  であるが  $v$  が絶乾木材の単位重量に対する水分量で表わされている場合は近似的に  $K'$  と  $k$  の間には  $K' = k/r_0$  ( $v$  が % であれば  $K' = \frac{100k}{r_0}$ ) なる関係が成立する故、MARTLEY 氏や EGNER 氏の実験によると一定の  $r_0$  に対し  $K'$  は繊維飽和点以下に於いても含水率によつて著しく変化し  $K' = \text{const}$  と仮定して (1), (2) 式の解を求めることは間違いであり、KOLLMANN 氏 (1936) はこの矛盾を避ける為に含水率によつて変化する未知の係数  $\xi$  をとり、 $K' = \frac{k}{r_0 \xi} = \text{const}$  なる形をとるべきではないかと提案しているが実験的又は理論的な裏付はない。HAWLEY 氏 (1931) は MARTLEY 氏を支持して TUTTLE 氏の実験は偶然の一致にすぎないとし自由水は必しも濃度差により移動する性質を有せず、高含水率区間の水分傾斜には普通の parabola 以外に 30 % 附近で不連続性を示す今一つの型が存在すると論じ、又 BATEMAN 氏等 (1939) は上述の如き矛盾は木材の capillary structure の複雑性によるものとし結局木材中の水分の移動は

- (a) 繊維飽和点以上では capillary force による自由水の移動
- (b) 繊維飽和点以下では水分傾斜による結合水の細胞壁内の移動
- (c) 全含水率区間に於ける蒸気圧傾斜による水蒸気の移動

に基くものであり繊維飽和点以下の乾燥は (b), (c) なる 2 つの異なつた拡散の組合せによるものであるとなし、更に Sitka spruce の定常乾燥に於いて normal green wood の場合には普通の拋物線類似の水分傾斜が現われるが人工的に完全に飽水せしめた試片では HAWLEY 氏の指摘した様な繊維飽和点附近で不連続点を有する水分傾斜が現われる事を実験的に裏書きし、又繊維飽和点以下の平均水分傾斜を用いて (3) 式を変形して種々な乾燥条件下に湿潤比重 0.365 の spruce について拡散係数  $k$  を計算し

- (a) 切線方向の拡散係数は熱気の関係湿度の変化に対して略無関係であり、 $40^\circ C$  では 0.381

$\sim 0.419 \times 10^{-5}$  g/cmsec である。

(b) 温度の上昇, 圧力の減少と共に  $k$  はかなり増加する。

(c) 比重の増加は  $k$  の減少を来す。

ことを述べている。又 VOIGT 氏等<sup>15)</sup> (1940) は高含水率の木材内部の水分移動がガス拡散と毛管通導との相互的な作用によるものとして前者に対しては STEFAN の拡散式に類似の式を用い後者に対しては内部の小なる毛管がより大なるものより常に自由水を吸引する故ある一定の含水率以下では一定直径以下の毛管のみが水に満されている事から前出 (3) 式を用い, Rotbuche の乾燥実験から結局繊維飽和点以上では自由水, 結合水を含む毛管通導が水分移動の主要素であるが繊維飽和点以下ではガス拡散が主要素を占めるものと結論している。擬て MARTLEY 氏や EGNER 氏によるとたとへ繊維飽和点以下に於いても水分拡散率  $K'$  は含水率によつて著しく変化するが BATEMAN 氏等によると  $K'$  は略 const であり得ることになり, 又 SCHLÜTER 氏等<sup>16)</sup> (1939) は Erle 及び Kiefer の実際の乾燥作業に於いて水分傾斜曲線を求め拡散係数  $k$  を EGNER 氏の方法により算出し, 含水率が低下しても  $k$  が略 const であり, 寧ろ逆にやや増加の傾向にあると述べ, 更に STAMM 氏は針葉樹材について pit membrane pore, pit chamber, cell wall capillarity, fiber cavity 等の直, 並列混淆の系統を構想して之に ohm の電気抵抗に関する法則を適用し  $K'$  に相当する水分拡散率  $D_t$  (繊維に直角),  $D_l$  (繊維に平行) を与える式を導き之に組織学的 dimension の値を与えて繊維飽和点以下に於ける値を具体的に計算しているが之によると  $D_t$  は比重が 0.36 より低い場合にはかなり含水率の影響をうけるが, これより重くなると実用上には略 const になる故之等の諸結果から見ると  $K' = \text{const}$  なる假定が少くとも繊維飽和点以下に於いて正当視され得ることになる。尙 STAMM 氏は  $D_t$  が比重の増加と共に拋物線的に増加すること又温度と共に増加し  $50^\circ\text{C}$  以下では 6% 以上の含水率区間に対し略 const であるが, それより高温では 6% 附近に 1 つの max. pt. を持つこと, 而してこれは高温では蒸気圧傾斜による水蒸気の移動が盛になる為であろうと述べて又上記の計算値を MARTLEY, BATEMAN, SHERWOOD 氏等の実験値と比較して針葉樹材に対してはよく一致するが闊葉樹材に対しては針葉樹材程一致しないが傾向は同一であること, 減圧した場合ガス拡散が全拡散中の主位を占める為 6% 附近に max. pt. が現われ,  $D_t$  は含水率に対して最早や const であり得ないこと等を論じている。又最近では小倉氏<sup>18)</sup> がブナ柾目材を  $45^\circ\text{C}$ , 50% で定常乾燥し, 水分拡散率  $K'$  が繊維飽和点以下では略 const なる事及び厚さが大きい程その値が大きくなる事を見出している。

## II 擴散方程式

以上の如く木材の熱気乾燥に熱伝導式を適用し得るや否やについては高含水率区間は勿論繊維飽和点以下に於いても種々の異説があるが本報告は筆者が数種の樹材について水分蒸発量と水分傾斜の 2 つの面から含水率によつて表わされた拡散方程式を用いて此の間の検討を試みたもので実験資料が少ない為結論を述べる迄には達していないが, 一応茲に報告し詳細は尙今後の実験に

俟ちたいと考えている。

拡散法則によつて求められる基礎微分方程式は熱伝導の場合と同様に取扱われる。即ち今  $u$  を木材の単位容積中に含まれる水分量 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) とすれば拡散法則

$$dw = -k' \frac{du}{dx} dAd\theta \quad \text{--- (6)}$$

$k'$  : 拡散係数  $\text{cm}^2/\text{h}$

から基礎式は

$$\frac{\partial u}{\partial \theta} = k'_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k'_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + k'_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \text{--- (7)}$$

となり又  $u$  を絶乾木材の単位重量中に含まれる水分量で表わした場合には

$$dw = -k \frac{du}{dx} dAd\theta \quad \text{--- (3)}$$

$k$  : 拡散係数  $\text{g}/\text{cmh}$

から若木材の乾燥による収縮を省略すれば

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial \theta} &= \frac{1}{r_0} \left( k_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ &= K'_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K'_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + K'_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\frac{\partial u}{\partial \theta}} \right\} \text{--- (8)}$$

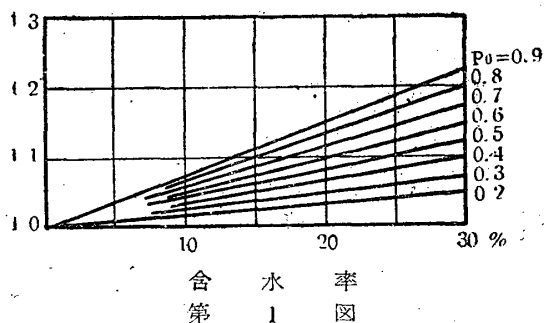
$r_0$  : 木材の絶乾密度

となり  $K'$  を熱伝導に於けると同様に水分拡散率と呼ぶことにすると  $K' = \frac{k}{r_0}$ , 若し  $u$  が % で表わされておれば  $K' = \frac{100}{r_0} k$  となり, EGNER, 小倉氏等は何れもこの式を適用している。

然し乍ら理論的には木材の収縮を省略することは出来ない故, 湿潤容積  $V_u$  と絶乾容積  $V_0$  との間に KOLLMANN 氏が求めた関係式  $V_u = V_0 (1 + 0.84\rho_0 u)$ , [但し  $\rho_0$  は木材の絶乾比重] を適用すると基礎式は含水率 30 % 以下に対して

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial \theta} &= \frac{1 + 0.84\rho_0 u}{r_0} \left( k_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ &= K_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\frac{\partial u}{\partial \theta}} \right\} \text{--- (9)}$$

となる。但し  $K = (1 + 0.84\rho_0 u) K'$  で若し 30 % 以上で収縮が起らないと仮定すれば繊維飽和点以上の高含水率区間に対しては上式中の  $0.84\rho_0 u$  に  $u = 0.3$  を用いればよい。第1図は  $1 + 0.84\rho_0 u$  を図示したものでその値は密度, 含水率の減少に従い若干減少する。従つて  $\frac{1 + 0.84\rho_0 u}{r_0}$  は一定の比重に対し, 繊維飽和点以下に於いても  $u$  の減少と共に若干減少する傾向を有するが普通の樹材に対しては実用上 const と見做しても大なる誤差を生じない。而して (7) 式の  $k'$  と (8), (9) 式の  $K'$  又は  $K$  は同一の dimension



を有する故  $u$  の単位のとりに方に相違があつても結局之等の係数は同様の意味をもつことになる。

TUTTLE, 長沢, 小倉氏等は (8) 式を用いて全含水率区間或いは繊維飽和点以下の drying data から  $K' = \frac{k}{r_0} = \text{const}$  を SHERWOOD, 亀井氏等は (7) 式から減率第2段に対して  $k = \text{const}$  を又 MARTLEY, EGNER 氏は夫々 (3), (5) 式から繊維飽和点以下に於いても  $k$  が相当変化する結果を得ている事は前述した通りである。従つて後者の実験結果を採れば, 水分拡散率  $K$  は繊維飽和点以下に於いても相当変化することになる故 (8), (9) 式の解は不可能ではないが甚だ複雑になつて到底実用には適しないし KOLLMANN 氏が提案した  $k$  を  $(1+0.84\rho_0 u)$  に相当するものと解釈すると全く反対の結論をもたらすことになる。之に反し SCHLÜTER, BATEMAN, SATMM 氏等の結果を用いれば少くとも繊維飽和点以下に於いて  $K'$  又は  $K$  を略  $\text{const}$  と見做し (8), (9) 式の解を簡単に求めることが根拠づけられる。この様な矛盾の原因については早計に断定を下すことは出来ないが EGNER 氏は水分傾斜を用いて水分蒸発量にはあまり考慮を拂つていない様であり, 又 SHERWOOD, 長沢氏等は反対に水分蒸発量のみを問題にして実際に現われる水分傾斜を求めている事等実験上不充分な点も少なく之等について尚検討すべき多くの余地が残されている様である。

扱て今簡単の為に板材について (9) 式の  $K = \text{const}$  を仮定すると

$$\frac{\partial u}{\partial \theta} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \text{--- (10)}$$

(10) 式を用いて主な場合の理論解を求めると 但し  $K = \frac{k_x}{r_0} (1+0.84\rho_0 u)$

#### A. 定常乾燥の場合

熱伝導に於けると同様にして木材表面の境界層を通して木材から熱気中へ蒸発する水分量が一応熱気に対する平衡含水率  $u_{eq}$  と木材表面の含水率  $u_s$  の差に比例するものと仮定すれば境界条件として

$$x = \pm a \text{ に於いて } \frac{\partial u}{\partial x} \mp h(u - u_{eq}) = 0 \quad \text{--- (11)}$$

但し  $h = \alpha/k$

$k$  : 拡散係数 g/cmh

$\alpha$  : 表面蒸発係数 g/cm<sup>2</sup>h

始めの水分傾斜を  $f(x)$  とすれば

$$\theta = 0 \text{ に於いて } u = f(x)$$

$$\text{又 } x = 0 \text{ に於いて } \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

今  $v = u - u_{eq}$  なる変換を行えば上式は

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v}{\partial \theta} = K \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \end{array} \right. \quad \text{--- (12)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = 0 : v = f(x) - u_{eq} = F(x) \end{array} \right. \quad \text{--- (13)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \pm a : \frac{\partial v}{\partial x} \mp hv = 0 \end{array} \right. \quad \text{--- (14)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x = 0 : \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \end{array} \right. \quad \text{--- (15)}$$

$$\begin{aligned} \text{この解は } v &= \frac{1}{a} \sum \frac{\delta_n}{\delta_n + \sin \delta_n \cos \delta_n} e^{-K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \theta} \\ &\times \cos \frac{\delta_n}{a} x \int_{-a}^a F(\lambda) \cos \frac{\delta_n}{a} \lambda d\lambda \quad \text{--- (16)} \\ \delta_n : \cot \delta &= \frac{\delta}{ha} \text{ の実根} \end{aligned}$$

(i) 始めの水分傾斜が均一で  $u_0$  なる時

$F(\lambda) = u_0 - u_{eq} = v_0$  とおくと上式から

$$\frac{v}{v_0} = 2 \sum e^{-K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \theta} \cos \frac{\delta_n}{a} x \frac{\sin \delta_n}{\delta_n + \sin \delta_n \cos \delta_n} \quad \text{--- (17)}$$

任意の時刻の断面平均含水率  $v_{av}$  は

$$\begin{aligned} v_{av} &= \frac{1}{a} \int_0^a v dx \\ \therefore \frac{v_{av}}{v_0} &= 2 \sum e^{-K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \theta} \frac{\sin^2 \delta_n}{\delta_n (\delta_n + \sin \delta_n \cos \delta_n)} \quad \text{--- (18)} \end{aligned}$$

特に拡散係数に比して表面蒸発係数が極めて大きい場合には  $h \rightarrow \infty$ , i.e.  $ha = \infty$  を仮定して  $x = \pm a$  に於いて  $u = u_{eq}$  i.e.  $v = 0$  即ち乾燥開始直後木材表面は熱気の平衡含水率に達しこの

時の条件  $\frac{\delta_n}{a} = \frac{2n-1\pi}{2a}$  を用いて (18) 式は

$$\frac{v_{av}}{v_0} = \frac{8}{\pi^2} \sum \frac{1}{(2n-1)^2} e^{-K \left( \frac{2n-1\pi}{2a} \right)^2 \theta} \quad \text{--- (19)}$$

となり恰も熱伝導に於ける steaming の場合に相当する。第2図は各種の  $ha$  に対して熱伝導の場合と同様にして求めた  $v_{av}/v_0$  と  $K \left( \frac{\theta}{a^2} \right)$  との dimensionless eq で略 (0,1) 附近を通る直線群を以て表わされることが判る。

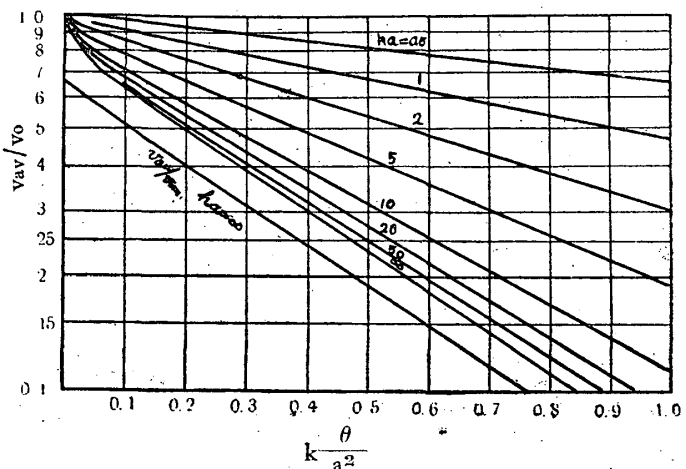
(ii) 始めの水分傾斜が抛物線をなす場合

$f(x) = u_m - \frac{u_m - u_s}{a^2} x^2$  (但し  $u_m$ ,  $u_s$  は夫々板の中央面並に表面の含水

率) 従つて  $F(\lambda) = v_m - \frac{v_m - v_s}{a^2} x^2$  を用いて (16) 式は結局

$$v = 2 \sum e^{-K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \theta} \cos \frac{\delta_n}{a} x \frac{\sin^2 \delta_n}{\delta_n + \sin \delta_n \cos \delta_n} \left\{ v_s + \frac{2(v_m - v_s)}{\delta_n^2} \right\} \quad \text{--- (20)}$$

任意の時刻に於ける断面の平均含水率は



第 2 図



$$v_{av} = 2 \sum e^{-K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \theta} \frac{\sin^2 \delta_n}{\delta_n (\delta_n + \sin \delta_n \cos \delta_n)} \left\{ v_s + 2(v_m - v_s) \frac{1}{\delta_n^2} \right\} \quad (21)$$

特に  $ha = \infty$  の場合  $\frac{\delta_n}{a} = \frac{2n-1\pi}{2a}$   $v_s = 0$  を用いて上式は

$$\frac{v_{av}}{v_m} = \frac{64}{\pi^4} \sum \frac{1}{(2n-1)^4} e^{-K \left( \frac{2n-1\pi}{2a} \right)^2 \theta} \quad (22)$$

尙この時  $v_{av}/v_m = 2/3 = 0.667$  なるを故上式の dimensionless eq は  $(0, 0.667)$  を通る略直線を以て表わし得ることになる。(第2図参照)。

### B. 不定常乾燥の場合

熱気の温, 湿度が時間的に変化する場合は A に於ける  $u_{eq}$  が時間的に変化する事になる故  $u_{eq} = \varphi(\theta)$  とおけばよい。然しこの場合水分拡散率  $K$  は温, 湿度の変化に対して必しも一定ではなく例へば  $K$  が温度により変化することはその程度に差異はあるが亀井 (1937), BATEMAN (1939), STAMM (1946) 氏等の一致した結論であるが之に反し, 湿度の変化に対しては異論があり, 亀井氏は湿度の減少と共に  $K$  が増加するとなし BATEMAN 氏は  $K$  が const なることを論じており早計に判断を下すことは出来ないが一般に内部拡散主要素の乾燥段階に於いては  $K$  に対する湿度の影響が温度のそれに比して著しく少ないと考えられる。従つて若干の温度変化とかなりの湿度変化を許容したある程度限定された不定常乾燥に於いて  $K = \text{const}$  を仮定すれば

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial \theta} = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} & (10) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \theta = 0 : u = f(x) & (23) \end{cases}$$

$$\begin{cases} x = \pm a : \frac{\partial u}{\partial x} \mp h \{ u - \varphi(\theta) \} = 0 & (24) \end{cases}$$

この特解は

$$u = \frac{1}{a} \sum e^{-K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \theta} \cos \frac{\delta_n}{a} x \frac{\delta_n}{\delta_n + \sin \delta_n \cos \delta_n} \times \left[ \int_{-a}^a f(\lambda) \cos \frac{\delta_n}{a} \lambda d\lambda + 2a \frac{\sin \delta_n}{\delta_n} K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \int_0^\theta e^{-K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \xi} \varphi(\xi) d\xi \right] \quad (25)$$

(i) 始めの水分傾斜が均一で  $u_0$  なる場合

$f(\lambda) = u_0$  とおき

$$u = 2 \sum e^{-K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \theta} \cos \frac{\delta_n}{a} x \frac{\sin \delta_n}{\delta_n + \sin \delta_n \cos \delta_n} \times \left[ u_0 + K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \int_0^\theta e^{-K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \xi} \varphi(\xi) d\xi \right] \quad (26)$$

断面の平均含水率は

$$u_{av} = 2 \sum e^{-K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \theta} \frac{\sin^2 \delta_n}{\delta_n (\delta_n + \sin \delta_n \cos \delta_n)} \times \left[ u_0 + K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \int_0^\theta e^{-K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \xi} \varphi(\xi) d\xi \right] \quad (27)$$

$ha = \infty$  なる場合  $\frac{\delta_n}{a} = \frac{(2n-1)\pi}{2a}$  を用いて上式は

$$u_{av} = \frac{8}{\pi^2} \sum \frac{1}{(2n-1)\pi} \left[ u_0 + K \left( \frac{2n-1\pi}{2a} \right)^2 \int_0^\theta e^{-K \left( \frac{2n-1\pi}{2a} \right)^2 \xi} \varphi(\xi) d\xi \right] \quad (28)$$

(ii) 始めの水分傾斜が拋物線をなす場合

$f(\lambda) = u_m - \frac{u_m - u_s}{a^2} x^2$  を用いて

$$u = 2 \sum e^{-K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \theta} \cos \frac{\delta_n}{a} x \frac{\sin \delta_n}{\delta_n + \sin \delta_n \cos \delta_n} \left[ u_s + 2(u_m - u_s) \frac{1}{\delta_n^2} + K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \int_0^\theta e^{-K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \xi} \varphi(\xi) d\xi \right] \quad (29)$$

従つて任意の時刻に於いて

$$u_{av} = 2 \sum e^{-K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \theta} \frac{\sin^2 \delta_n}{\delta_n (\delta_n + \sin \delta_n \cos \delta_n)} \left[ u_s + 2(u_m - u_s) \frac{1}{\delta_n^2} + K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \int_0^\theta e^{-K \left( \frac{\delta_n}{a} \right)^2 \xi} \varphi(\xi) d\xi \right] \quad (30)$$

$ha = \infty$  の場合  $\frac{\delta_n}{a} = \frac{(2n-1)\pi}{2a}$ ,  $u_s = 0$  とおき

$$u_{av} = 2 \sum e^{-K \left( \frac{2n-1\pi}{2a} \right)^2 \theta} \left( \frac{2}{2n-1\pi} \right)^2 \left[ 2u_m \left( \frac{2}{2n-1\pi} \right)^2 + K \left( \frac{2n-1\pi}{2a} \right)^2 \times \int_0^\theta e^{-K \left( \frac{2n-1\pi}{2a} \right)^2 \xi} \varphi(\xi) d\xi \right] \quad (31)$$

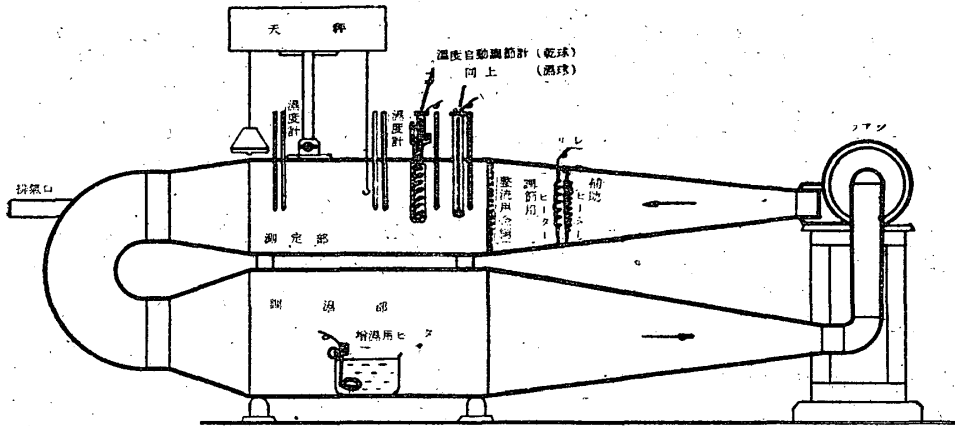
を得る。

### Ⅲ 乾 燥 実 験

#### A. 実 験 装 置

実験装置は第3図に示してある如く測定部の主要寸法  $35 \times 35 \times 110 \text{cm}$  のブリキ製で測定部及び調湿部には外層に厚さ約  $5 \text{cm}$  の保温層を有し風管部は全部木枠によつて囲み、保温した。温度調節には2個のニクロム線を用い1個は補助用として変圧器を調節して予定温度より若干低目に加熱し、以後調節用ヒーターと自動温度調節計及びリレーを用いて常に一定温度の熱気を

作り得る様にした。次に湿度調節は先づ排気孔を調節して装置内の熱気をやゝ減湿側におき湿球にした自動温度調節計を予定の湿球温度で作用し得る様に調節し、リレーと増湿用ヒーターを用



第 3 図

いて湿度、従つて湿球温度が下ればヒーターにより水蒸気の蒸発を盛にし、増湿して湿球温度が上れば蒸発を停止する如くした。この

方法は調湿が増湿一方であるが結果は極めて良好であつた。

試片の秤量 は測定部の上部に小孔をあけ測定時に之を開いて天秤により直接試片重量を測定した。尚上部には数個の補助小孔を設け、必要に応じて使用し得る様にした。風速の調節 は変圧機により送風機の回転数を加減した。送風機的能力は測定部に於て平均速度約 1m/sec を出し得るが本実験には 0.4~0.5m/sec を用いた。

尚本実験装置の設備に際して林業試験場齊藤美鶯、小倉武夫両氏の御盡力を戴いた。記して深く感謝の意を表したい。

## B, 実験方法

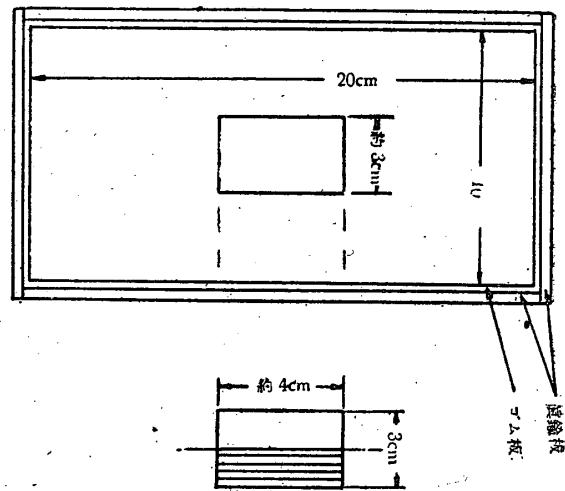
### (i) 繊維飽和点以上の場合

ヒバ、スギの心材から面積 10×15cm、厚さ夫々 0.2, 0.5, 1.0, 3.0cm の4種の板目材をとり 2~3 日間真空デシケーター中し減圧した後約半日間吸水せしめ、以後底に水をいれたデシケーター中に約半年間放置して試片内の水分の均一化を計り、実験の直前厚さ 3cm の試片について水分傾斜を測定した所、ヒバは大体均一であつたがスギはやゝ表面過湿であつた。之等の試片は何れも側面に蒸発防止の意味で、セルロイド溶液を塗布した後(この方法は乾燥中セルロイドの部分的剝離を生じ完全ではなかつた)熱気を 55°C, 40%, 0.4~0.5m/sec に調節した実験装置の測定部に素早く静置して、定常乾燥を行い厚さ及び含水率に応じて 30分~3時間おきに秤量すると共に各厚さ共試片の一個に側面から 1~4 個の温度測定点を作り thermo couple を挿入して試片の温度傾斜を測定した。

### (ii) 繊維飽和点以下の場合

気乾のサワラ心材、サクラ辺材から面積 10×20cm、厚さ 3cm の板目材を作り、底に水を入れたデシケーター中に約半年間放置して繊維飽和点に達せしめた後側面にセルロイド溶液を塗布し、更にその上を厚さ 2mm のゴム板及び真鍮板で覆い捻釘によつて固く締付け、再びデシケーター中にいれて約 70~80 時間 54°C の恒温器内におき試片と熱気との温度差が水分蒸発に与え

る影響を防止した。この試片を予め  $54^{\circ}\text{C}$ 、40%、 $0.4\sim 0.5\text{m/sec}$  に調節した装置内にいれ、水分蒸発量を1~3時間おきに測定すると共に予定の乾燥度迄乾燥した試片を適時取出してその中央部附近から第4図の如く5個の薄片を素早く切断して秤量瓶にいれ秤量乾燥して水分傾斜を算出した。

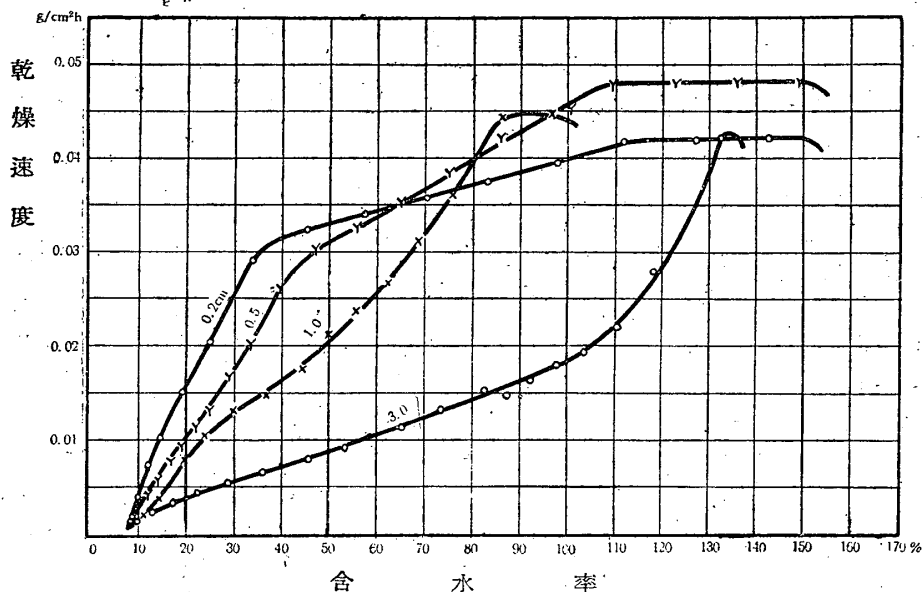


第 4 図

### Ⅲ 実験結果並に考察

#### A. 繊維飽和点以上の場合

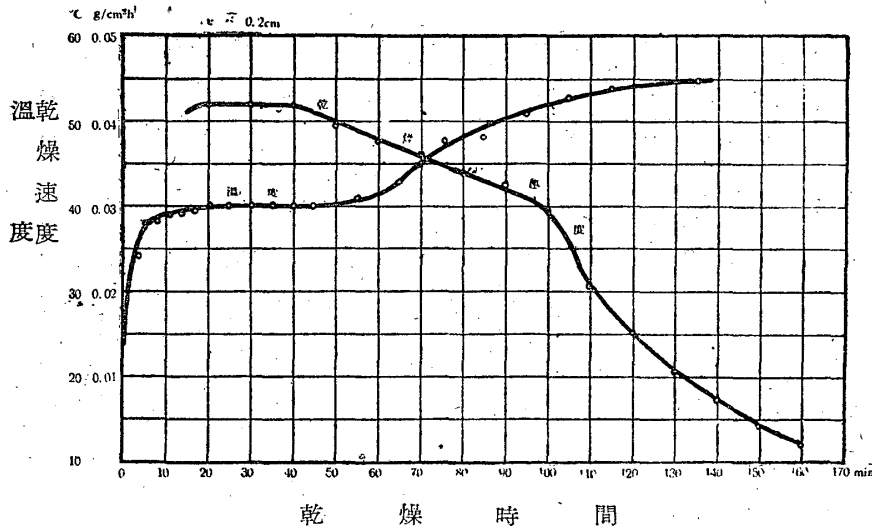
初めの含水率が略均一であつたヒバについて乾燥時間  $\theta(\text{h})$  と蒸発水分量  $W(\text{g})$  の平滑曲線上に適宜切線をひき図上から  $dW/d\theta$  を求め之を蒸発面積で除して得た乾燥速度と含水率の関



第 5 図

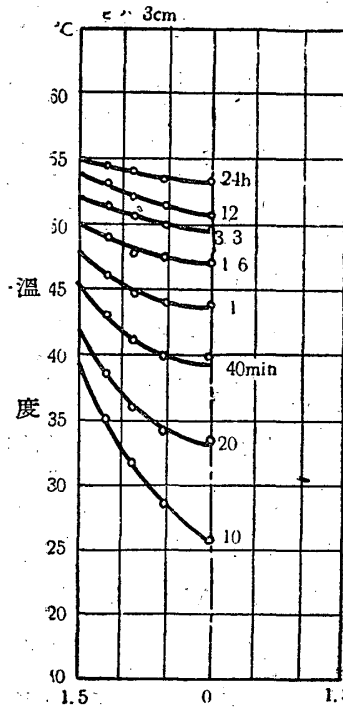
係を各厚さに対して求めると、第5図の如く固体乾燥の最も typical な曲線をなし、厚さ 0.2, 0.5 cm では明瞭な乾燥3段階が現われるが厚さの増加に従つて漸次減率第1段並に恒率乾燥区間を飲み厚さ 3cm では最初から減率第2段が始まる。即ち薄物では内部水分の移動が比

較的容易な為に相当期間表面蒸発が乾燥の主要素を占めるが厚いものでは内部移動が初めから乾燥の主要素を占めることを示し、この事を第6, 7図の乾燥速度と木材の内部温度の関係から比較して見ると、例へば 0.2cm では恒率乾燥中木材温度は丁度熱気の湿球温度を維持し減率第1段から再び上昇して次第に乾球温度に近づくが、厚さが増すに従つてこの関係は次第に消滅して

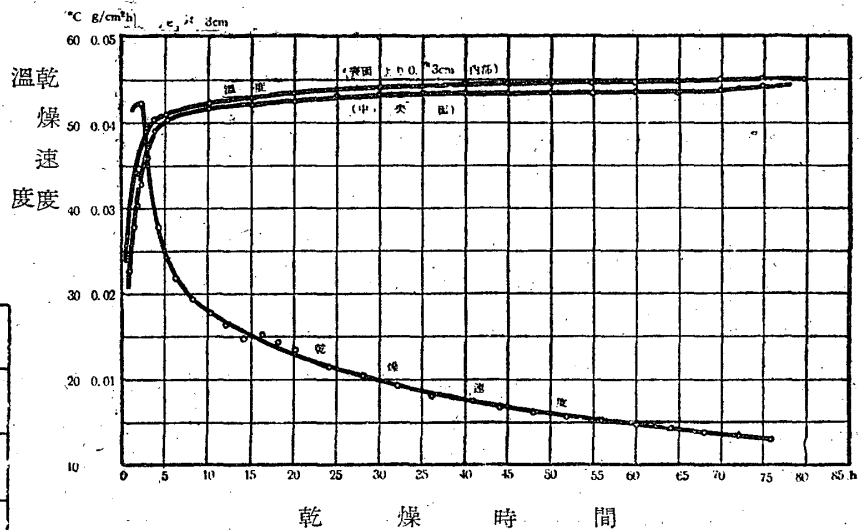


第 6 図

も最初極く短時間乍ら表面蒸発を行うことを示すものでどの程度の厚さ迄初め相当の期間表面蒸発が主要素であ



第 8 図



第 7 図

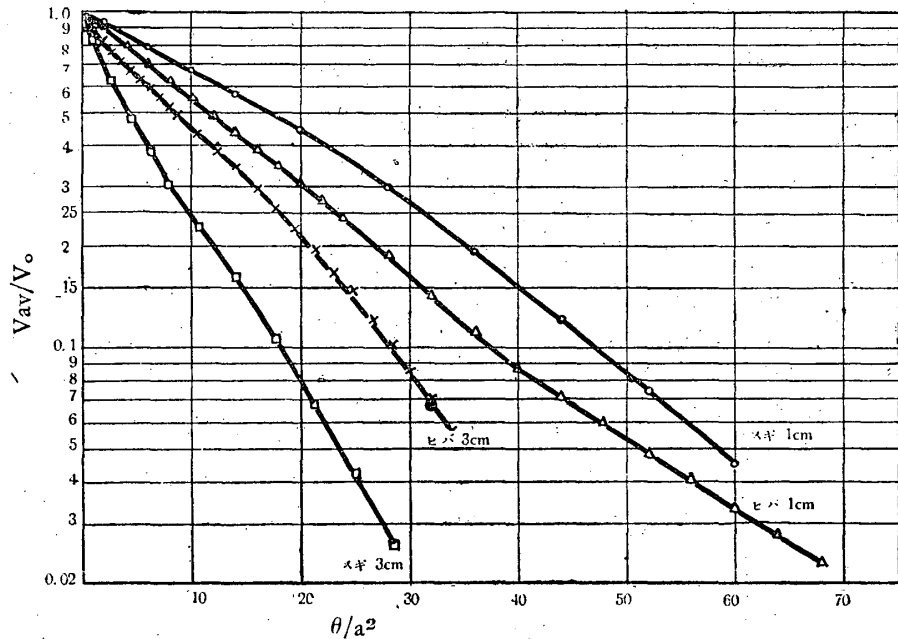
3cm では完全にこの現象を認める事が出来ない事からも裏付ける事が出来る。之等の温度上昇経過は勿論一般の熱伝導理論に従うものではない。第8図は乾燥中の温度傾斜の一例を示したものである。第5図から厚さの如何にかゝらず乾燥開始直後の乾燥速度が略相等しいことは厚いもので

り得るかは乾燥条件、含水率、樹種特に各種細胞の配列状態等によりかなり相違するものと考えられるが、本実験の条件では厚さ 1 cm 前後がこの限界にあるものと推定する事が出来、又 TUTTLE, SHERWOOD, 小倉氏 等の実験結果から考察しても 少くとも厚さ 1cm 以上に対して始めて拡散方程式の適用が一般性を持ち得るものと考えられる。この様に厚さによつて乾燥機構が根本的に相異なる以上高含水区間に対し、無条件に一律に拡散方程式を用いることは不相当であると云わなければならない。乾燥の機構が

拡散に基くものである為には第2図に示した様に  $v_{av}/v_0$  と  $|K \theta/a^2|$  従つて  $\theta/a^2$  は半対数方

眼紙上に略直線的に並ばねばならない。第9図は初めから直ちに減率第2段を呈するヒバ・スギの厚さ 3cm, 1cm

について  $V_{av}/V_0$  と  $\theta/a^2$  の関係を plott したものでこの結果によつて見るとスギ 3cm では略直線的であるが、其の他の場合には曲線となり SHERWOOD 氏が popular につき又亀井氏がヒノキについて行つた実験結果程理論式には合致しない。従つて減率第2段に対しても拡散

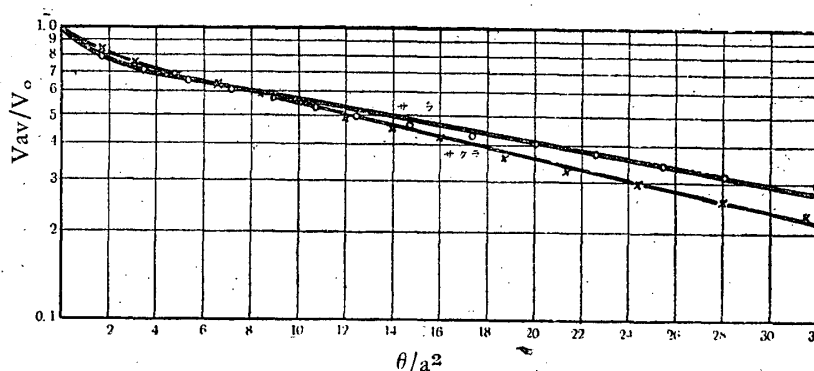


第 9 図

方程式が適用出来るという事にはわかに認め難い所である。薄物の減率第2段の data についてもこの関係を検討する必要があるが、この場合の減率第2段の初めの水分傾斜が決定し得なかつた為に省略した。

#### B. 繊維飽和点以下の場合

一般に含水率が繊維飽和点以下の場合に拡散方程式の適用の可能性が最も大きいと考えられる。筆者は之をサワラ ( $r_0=0.4$ ) 及びサクラ ( $r_0=0.63$ ) について検討して見た。先づ乾燥速度測定用の試片について乾燥時間  $\theta$  と蒸発水分量との平滑曲線から修正した板の平均含水率  $u_{av}$  から  $V_{av}/V_0$  と  $\theta/a^2$  の関係を求めて見ると第10図の如く理論式に極めてよく合致した形となる。



第 10 図

條件は前述した如く  $x=na$  に於いて  $v=0$  を意味し、従来多くの研究者が全乾燥区間或いは

る。従つて第2図のグラフを用いて、例へばサハラについて第1表の如く各  $ha$  に対して  $K$  を求め、最も確からしい場合としてその平均値  $K_{av}$  から算出した  $K_{av}$   $\theta/a^2$  と  $K \theta/a^2$  の偏差の自乗の最小なる場合を求めると  $ha=\infty$  となる。この

(サハラ,  $2a=3\text{cm}$ ,  $\gamma_0=0.40$ )

hr	$U_{av}$	$V_{av}/V_0$	$\theta/a^2$	$ha = \infty$				5 0			
				$K \frac{\theta}{a^2}$	K	$K_{av} \frac{\theta}{a^2}$	(偏差) <sup>2</sup>	$K \frac{\theta}{a^2}$	K	$K_{av} \frac{\theta}{a^2}$	(偏差) <sup>2</sup>
0	0.240						$\times 10^{-4}$				$\times 10^{-4}$
4	0.207	0.818	1.78	0.027	0.0152	0.0264	0.0036	0.027	0.0152	0.0272	0.0004
8	0.192	0.733	3.56	0.056	0.0157	0.0527	0.109	0.060	0.0168	0.0545	0.3025
12	0.182	0.675	5.33	0.084	0.0158	0.0789	0.261	0.088	0.0165	0.0816	0.409
16	0.173	0.620	7.11	0.114	0.0160	0.105	0.81	0.118	0.0166	0.109	0.81
20	0.165	0.580	8.88	0.137	0.0154	0.131	0.36	0.142	0.0160	0.136	0.36
24	0.160	0.551	10.7	0.158	0.0148	0.158	0	0.165	0.0154	0.164	0.01
28	0.152	0.506	12.4	0.193	0.0156	0.183	1.00	0.200	0.0161	0.190	1.00
33	0.146	0.471	14.7	0.221	0.0150	0.218	0.09	0.230	0.0156	0.225	0.025
39	0.139	0.432	17.3	0.257	0.0149	0.256	0.01	0.268	0.0155	0.265	0.009
45	0.135	0.409	20.0	0.281	0.0140	0.296	2.25	0.293	0.0147	0.306	1.69
51	0.129	0.375	22.7	0.315	0.0139	0.336	4.41	0.328	0.0145	0.348	4.0
57	0.124	0.346	25.4	0.350	0.0138	0.376	6.76	0.362	0.0143	0.389	7.29
63	0.119	0.318	28.0	0.383	0.0137	0.414	9.61	0.399	0.0143	0.428	8.41
72	0.115	0.296	32.0	0.413	0.0129	0.473	36.0	0.426	0.0133	0.489	39.69
				$K_{av}=0.0148$		$\Sigma=$	61.67	$K_{av}=0.0153$		$\Sigma=$	64.23

減率第2段に対して仮定した条件であり, この時の水分拡散率の平均値は  $K_{av}=0.0148\text{cm}^2/\text{h}$  ( $4.11 \times 10^{-6}\text{cm}^2/\text{sec}$ ) で表より明かな様に K の値は含水率の減少と共に若干低下するが一定  $K=\text{const}$  と見做してその平均値を用いても差支えない. 例へば  $K=0.0148$  では  $\theta=72\text{h}$  に対

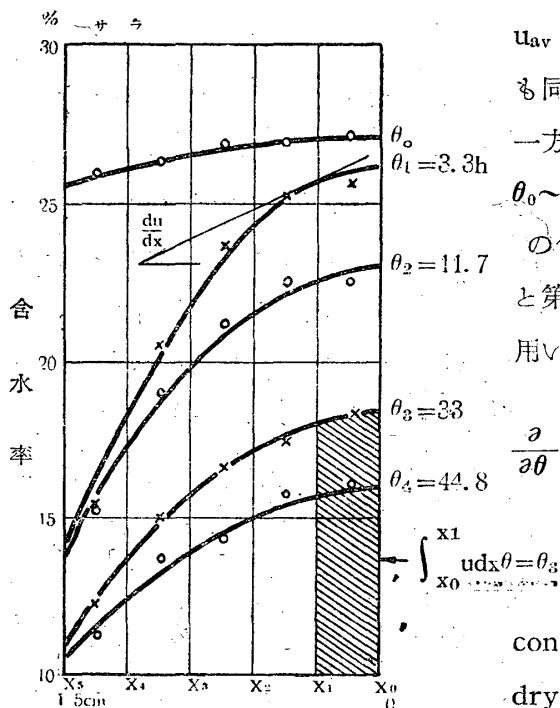
する平均含水率  $u_{av}=10.8\%$  に対し,  $K=0.0129$  では  $u_{av}=11.4\%$  でその差は僅少である. サクラについても同様にして  $ha=\infty$  に於いて  $K_{av}=0.0153$  を得た.

一方上の試片と同時に乾燥した他の試片を任意の時刻  $\theta_0 \sim \theta_4=0, 3.3, 11.7, 33, 44.8\text{h}$  に順次取出して薄片の含水率を求め抛物線としての水分傾斜曲線を求めると第11図となる(何れも2個の平均). このグラフを用いて EGNER 氏の方法により graphically に  $\frac{\partial u}{\partial x}$

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \int u dx \text{ を求め (第11, 12図参照) } k = \frac{r_0}{100} \frac{\frac{\partial}{\partial \theta} \int u dx}{\frac{\partial u}{\partial x}}$$

からkを計算して相当する含水率に対して図示すると第13図となる. 之から明かな様に  $k=\text{const}=1.4 \times 10^{-4}$  (従つて  $K'=0.035\text{cm}^2/\text{h}$ ) となり

drying data より求めたKの値とかなりの差異を生じており第1表から見ると大体  $ha=4$  の場合に相当する.



第 11 図

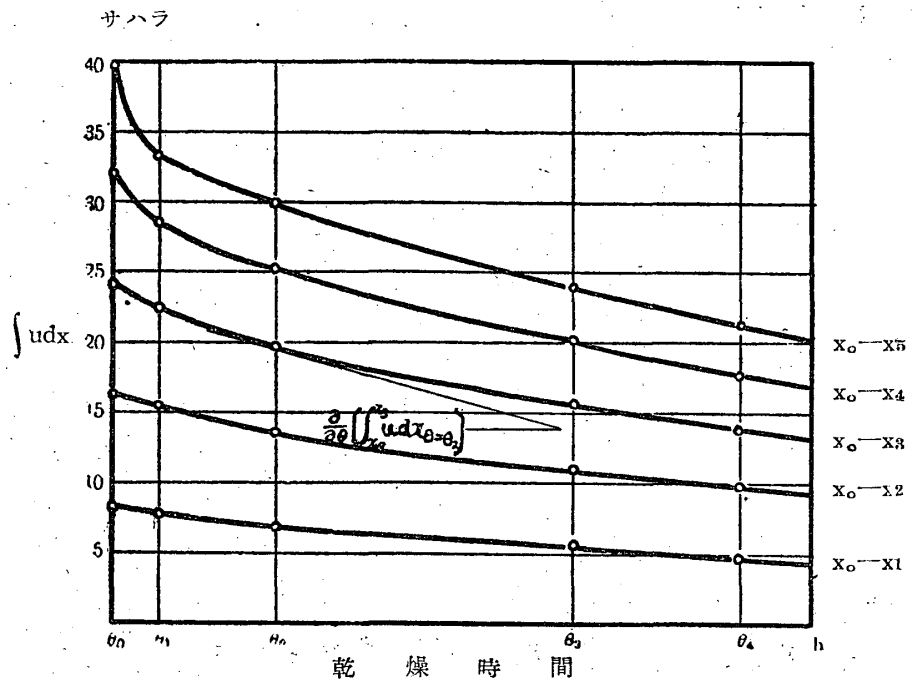
1

表

(裏面へ続く)

2 0				1 0				5			
$K \frac{\theta}{a^2}$	K	$K_{av} \frac{\theta}{a^2}$	(偏差) <sup>2</sup>	$K \frac{\theta}{a^2}$	K	$K_{av} \frac{\theta}{a^2}$	(偏差) <sup>2</sup>	$K \frac{\theta}{a^2}$	K	$K_{av} \frac{\theta}{a^2}$	(偏差) <sup>2</sup>
			$\times 10^{-4}$				$\times 10^{-4}$				$\times 10^{-4}$
0.028	0.0157	0.036	0.64	0.039	0.0219	0.0368	0.049	0.08	0.0449	0.055	6.25
0.065	0.0182	0.0612	0.14	0.087	0.0244	0.0737	1.77	0.147	0.0413	0.110	13.7
0.100	0.0187	0.0917	0.69	0.127	0.0238	0.110	2.89	0.198	0.0371	0.165	10.9
0.139	0.0195	0.122	2.89	0.168	0.0236	0.147	4.11	0.253	0.0356	0.220	10.9
0.177	0.0199	0.153	5.76	0.200	0.0225	0.184	2.56	0.294	0.0331	0.275	3.61
0.191	0.0178	0.184	0.49	0.226	0.0211	0.222	0.16	0.326	0.0320	0.330	0.16
0.228	0.0184	0.213	2.25	0.268	0.0216	0.257	1.21	0.380	0.0306	0.383	0.09
0.261	0.0178	0.253	0.64	0.302	0.0205	0.304	0.04	0.422	0.0287	0.454	10.24
0.300	0.0173	0.298	0.04	0.346	0.0200	0.358	-1.44	0.478	0.0276	0.524	31.36
0.325	0.0163	0.344	3.61	0.375	0.0188	0.414	15.21	0.516	0.0258	0.618	104.04
0.362	0.0160	0.390	7.84	0.414	0.0182	0.470	31.36	0.568	0.0250	0.70	176.89
0.400	0.0158	0.437	13.69	0.454	0.0179	0.526	51.84	0.618	0.0243	0.784	275.56
0.437	0.0156	0.482	20.25	0.495	0.0177	0.580	72.25	0.673	0.0241	0.865	368.64
0.467	0.0146	0.551	70.56	0.530	0.0166	0.662	174.24	0.717	0.0224	0.988	734.41
Kav=0.0712			$\Sigma=129.49$	Kav=0.0207			$\Sigma=359.13$	Kav=0.0309			$\Sigma=1746.75$

この事は実際に求めた水分傾斜が木材表面に於いて  $u_{eq}=0.063$  より遙かに高い事からも容易に想像される事であり、第 14 図は比較の為実測した水分傾斜曲線と  $h_a=\infty$ ,  $K=0.0148$  から計算した水分傾斜曲線を示したもので両者の間にはかなりの相違が認められる。之に反し同様の方法をサ



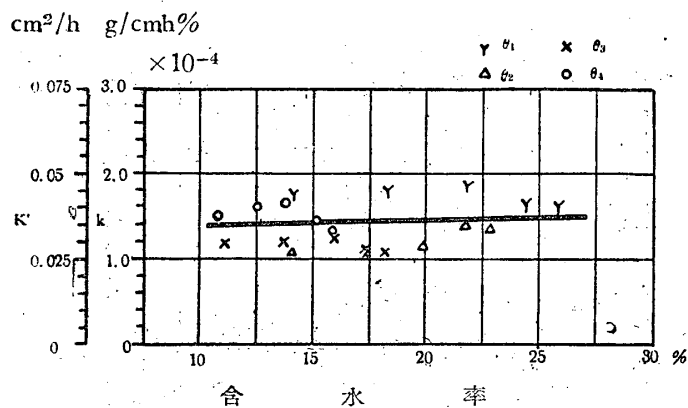
第 1 2 図

ラの水分傾斜曲線第 15 図に対して行い各含水率に対する  $k$  の値を求めて見ると第 16 図の如くなり、その平均値  $k=\text{const}=0.976 \times 10^{-4}$  (従つて  $K'=0.0155 \text{ cm}^2/\text{h}$ ) は drying data から求めた  $K=0.0153$  に殆んど一致し、従つて  $h_a=\infty$ ,  $K=0.0153$  から計算した水分傾斜は第 15 図中に破線で示す如く実測値とよく合致する。此の 2 つの現象を観察して見るにサクラの場合少



2				1				備 考
$K \frac{\theta}{a^2}$	K	$Kav \frac{\theta}{a^2}$	(偏差) <sup>2</sup>	$K \frac{\theta}{a^2}$	K	$Kav \frac{\theta}{a^2}$	(偏差) <sup>2</sup>	
			$\times 10^{-4}$				$\times 10^{-4}$	Ueq=
0.143	0.0803	0.0835	35.4	0.251	0.141	0.135	134.7	0.063
0.264	0.0741	0.167	94.0	0.395	0.111	0.271	154.0	
0.304	0.0570	0.250	29.2	0.504	0.0945	0.405	98.0	
0.378	0.0532	0.334	19.38	0.618	0.0870	0.541	59.3	
0.433	0.0488	0.416	28.95	0.708	0.0797	0.676	10.2	
0.477	0.0446	0.502	62.5	0.778	0.0727	0.815	13.7	
0.549	0.0442	0.581	10.22	0.894	0.0721	0.945	26.0	
0.608	0.0413	0.690	67.2	0.99	0.0673	1.12	169.0	
0.682	0.0394	0.811	166.3	1.103	0.0637	1.318	462.0	
0.734	0.0367	0.939	420	1.189	0.0594	1.521	1100.0	
0.806	0.0355	1.065	670	1.308	0.0576	1.728	1761	
0.876	0.0345	1.190	986	1.412	0.0557	1.932	2700	
0.950	0.0340	1.311	1303	1.527	0.0545	2.125	3700	
1.01	0.0316	1.500	2400	1.617	0.0505	2.435	5700	
Kav=0.0469			$\Sigma=3892.15$	Kav=0.0761			$\Sigma=10387.9$	

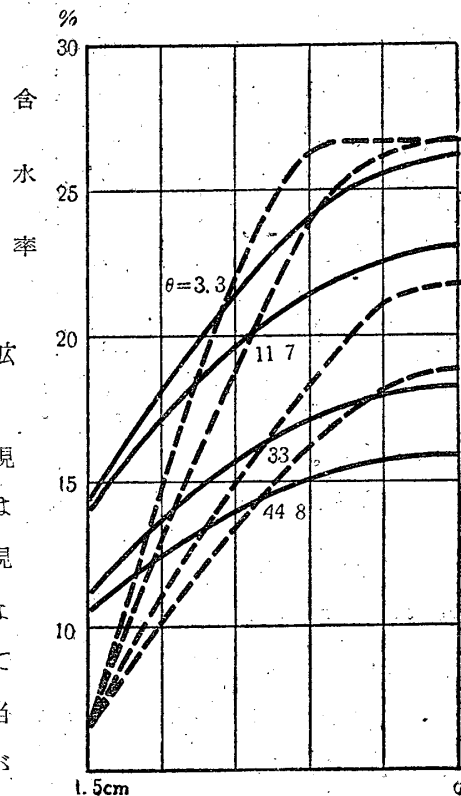
くとも繊維飽和点以下に於いて木材表面は実際に熱気の平衡含水率に達し、拡散によつて表面に到達した水分は何等の抵抗をうけることなく熱気中に出で所謂表面蒸発の現象は全く起り得ないで内部拡散が乾燥の主要素となり、 $ha=\infty$  とおいたⅡの理論解は実際とよく一致する。之に対しサハラの場合



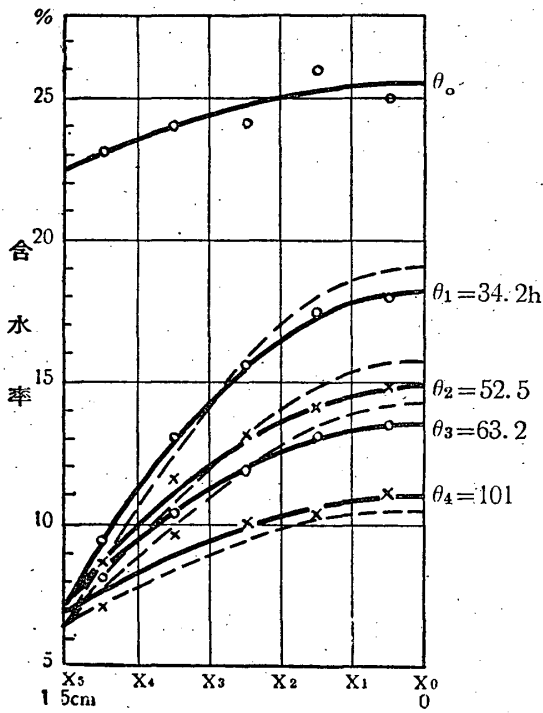
第 1 3 図

下に於いても尙相当の表面蒸発が起る。即ち乾燥は内部拡散と表面蒸発の両者によつて行われることが推定される。然しこの場合  $ha$  のある有限値に於ける理論解が実際の現象と合致すべきであるにかゝらず、上述した如く両者は一致しない。即ち平均含水率を与える解(18)は見掛上現象と一致しているが本質的には水分の移動を解明していない事になる。このサハラの場合はおそらく例外的であつて理論解と現象が一致しない原因の1つは境界条件が不適当な事によるものではないかと考えられるが、両者の何れが例外的であるか、或いは何れも例外的ではないかは以上の

熱気の平衡含水率よりもかなり高い含水率にある為、繊維飽和点以



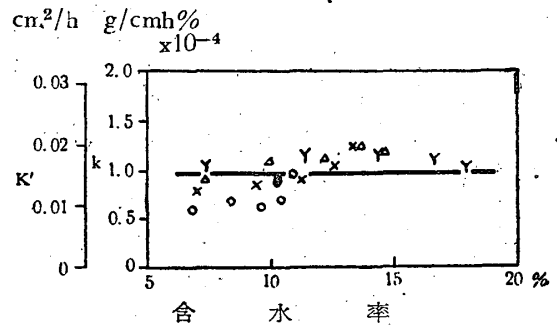
第 1 4 図



第 1 5 図

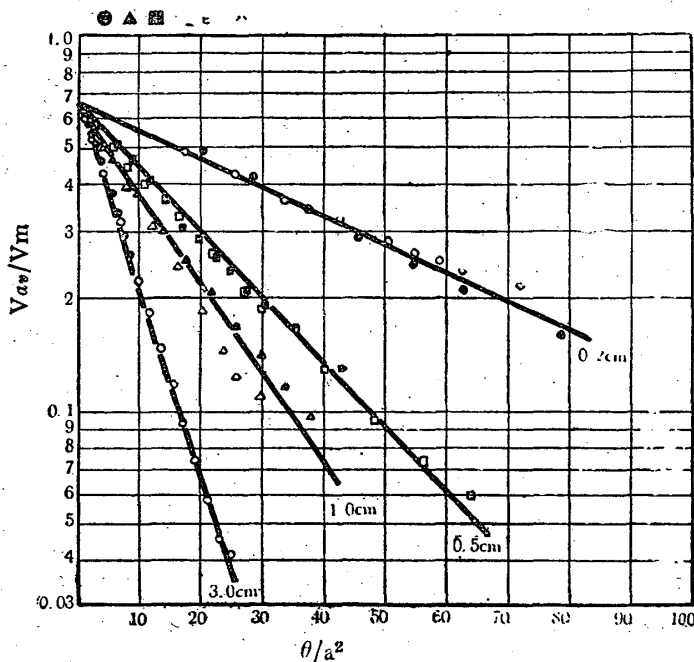
data からは断定し得ない。この様にⅡに示した理論解がすべての樹種に対して必しも適合しないことが認められるが之に対する結論は更に今後の実験に俟ちたい。

然し乍ら実用的な立場から見ると乾燥時間  $\theta$  と平均含水率の関係が重要でありこの点から考えると理論解 (18), (19), (21), (22), (27), (28), (30), (31) は極めて有用といわなければならない。



第 1 6 図

い。この意味で前に説明したヒバ、スギの繊維飽和点以下の data を再びとりあげて見た。即ち板の中央面の含水率が丁度繊維飽和点に達した場合の水分傾斜を拋物線と見做すと前に説明した所によつて  $u_m=0.3$ ,  $u_s=u_{eq}=0.063$ , この時の平均含水率  $u_{av}=(2u_m+u_s)/3=0.221$  従つて平均含水率22.1%の時から  $\theta$  を計り (22) 式の dimensionless eq. を用いて  $v_{av}/v_m$  と  $\theta/a^2$  の関係を求めると第17図の如く理論式とよく合致した傾向を有し同じ厚さのものが大体同一直線上に落ちること並に直線が厚さによ



第 1 7 図

上に落ちること並に直線が厚さによつて異なること言い換えれば水分拡散率が厚さによつて変化することが判る。之に関し小倉氏はブナの 0.2, 0.5, 0.8, 1.0cm につき同様に K が厚さによつて変化することを報じているが SHERWOOD 氏によると poplar 1.27, 1.9cm では K が相等しく筆者の実験と相反する結果が出ている。扱てスギ、ヒバの data から例へば第2表の如くにして水分拡散率を計算してその平均値を求めると第3表の如く厚さの増加と共に K の値が大きくなっている。

第 2 表  
(スギ 3cm)

hr	Uav	Vav	$\frac{Vav}{Vm}$	$\frac{\theta}{a^2}$	$K \frac{\theta}{a^2}$	K	備 考
0	0.221	0.158	0.667				Ueq= 0.063
0.75	0.214	0.151	0.637	0.333	0.016	0.048	
1.75	0.207	0.144	0.607	0.777	0.025	0.0451	
2.75	0.199	0.133	0.531	1.22	0.064	0.0524	
3.75	0.192	0.129	0.544	1.66	0.08	0.0482	
4.75	0.185	0.122	0.514	2.11	0.10	0.0473	
5.75	0.175	0.116	0.489	2.56	0.12	0.0469	
7.75	0.168	0.105	0.443	3.42	0.158	0.0462	
9.75	0.159	0.096	0.405	4.23	0.197	0.0454	
11.75	0.150	0.087	0.367	5.22	0.266	0.0509	
13.75	0.143	0.080	0.337	6.10	0.27	0.0442	
15.75	0.136	0.073	0.308	7.0	0.307	0.0438	
17.75	0.130	0.067	0.282	7.88	0.342	0.0434	
20.75	0.118	0.055	0.232	9.22	0.422	0.0458	
25.75	0.108	0.045	0.190	11.4	0.502	0.0441	
29.75	0.099	0.036	0.154	13.2	0.587	0.0445	
33.75	0.092	0.029	0.122	15.0	0.680	0.0453	
39.75	0.086	0.023	0.097	16.8	0.775	0.0461	
41.75	0.081	0.018	0.0759	18.5	0.875	0.0472	
45.75	0.077	0.014	0.059	20.3	0.977	0.0481	
49.75	0.074	0.011	0.0464	22.1	1.075	0.0486	
53.75	0.071	0.010	0.0422	23.9	1.122	0.0469	
					Kav=0.0466		

第 3 表

樹 種	K $\frac{cm^2}{h}$			
	3. cm	1	0.5	0.2
ヒ バ ス ギ	0.0417	0.0222	0.0158	0.00675
	0.0466	0.0243	0.0167	0.00660

以下に於いて const であり得る事を論じ板の初めの水分傾斜が均一及び拋物線をなす場合に於いて定常及び不定常乾燥の理論解を求めた。

(2) 各種の厚さのヒバ、スギを高含水率から乾燥した場合厚さ 1cm 以下では恒率及び減率第1段が相当期間続く。厚さ 1cm 以上では主として減率第2段が現われるが、この場合でも熱伝導類似の式は必しも適合しない。

(3) 繊維飽和点以下から乾燥した場合板の平均含水率と乾燥時間との関係は  $ha = \infty$  とおいた理論解によく一致する。然し之から求めた水分拡散率と実測した水気傾斜から Egner 氏の方法によつて求めた水分拡散率は何れも含水率に無関係に const ではあるが、その絶対値は必しも合致しない。従つて両者の水分傾斜も必しも一致しない。理論解の適用範囲、境界条件の検討は更に今後の実験に俟たねばならない。然し実用上重要な平均含水率と乾燥時間の関係は見掛け

若し水分の移動が完全に拡散に基くものであれば K は厚さに無関係に一定でなければならぬ。従つてこの事からスギ、ヒバについてもサハラの乾燥に類似の現象が生じていることが想像される。又スギ、ヒバに比してサワラの水分拡散率が小さいのは樹種の相違よりもむしろ前者の側面防湿が後者程完全でなかつた事に起因するものと考えられる。

### V 摘 要

本報告は 2, 3 の樹材を 55°C, 40%, 0.4~0.5m/sec の熱気で定常乾燥した場合の実験結果を従来の研究者のそれと併せ考察したものである。

(1) 従来の熱伝導類似の式を修正し、その水分拡散率が通常の樹材に対して少くとも繊維飽和点

上よく理論解に一致する。従つてこの意味で解(18), (19), (21), (22), (27), (28), (30), (31)は有用であると考えられる。

## Résumé

The work was done to the drying of some species of woods under 55°C, 40% rel. Humid., 0.4~0.5 m/sec drying air conditions.

1. Fourier's eq. of the drying of timber

$$\frac{\partial u}{\partial \theta} = \frac{k}{r_0} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \text{--- (1)}$$

$u$  : moisture content per unit weight of dry wood.

$\theta$  : drying times.

$k$  : diffusion constant.

$r_0$  : density of dry wood.

$x$  : distance from mid-plane of slab.

was corrected as

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial \theta} &\approx (1+0.84\rho_0 u) \frac{k}{r_0} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \\ &= K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \end{aligned} \right\} \text{--- (2)}$$

$\rho_0$  : specific gravity of dry wood.

In eq. (2), the coefficient  $K$  i.e.  $(1+0.84\rho_0 u) \frac{k}{r_0}$  increases generally as  $u$  increases but in practical problems it is possible to consider as a constant at least below the fiber saturation point. Then, the theoretical solutions were required for uniform and parabolic initial moisture gradient at steady and unsteady drying conditions.

2. When drying started over the fiber-saturation point, the constant rate and 1st zone of falling rate period occupied the considerable part of all range of drying for timber thinner than 1 cm but for those thicker than 1cm the 2nd zone of falling rate period occupied the almost part of the drying time and eq(2) was not always adoptable even for the latter.

3. When the drying started below the fiber saturation point, the relation between drying time and the average moisture content of timber had a good agreement with theoretical solutions, but the moisture gradient calculated from  $K$  which obtained from application of solution did not always coincided with experi-

mentally measured moisture content gradient. The data was not sufficient to conclude the range of application of theoretical solutions.

4. For practical problems, however, the relation between drying time and the average moisture content of wood is important and for this purpose the solution (18), (19), (21), (22), (27), (28), (30), (31) are useful.

## 文 献

- 1) Tuttle, T (1925) J. Franklin Inst. 200
- 2) 長沢武雄, 鈎俣一 (1927) 九大農学部学藝雜誌 3 : 2
- 3) Sherwood, T. K. (1929) Ind and Eng Chem. 21
- 4) Newnann, A. B (1931) Trans Am Inst Chem Eng. 27
- 5) Sherwood, T. K. (1932-33) Ind and Eng Chm. 24, 25
- 6) 亀井三郎 (1937) 工業化学雜誌 40 : 7
- 7) " ( " ) " " : 9
- 8) Martley, J. F. (1926) Fores Prod. Res, Techn. Paper 2
- 9) 松本又三 (1941) 木材乾燥法
- 10) Ludwig, K (1933) Forsch Ber Holz. 1
- 11) Egner, K (1934) " " " 2
- 12) Kollmann, F (1936) Technologie des Holzes.
- 13) Hawley, I. F (1931) U. S. Agric. Bull. 248
- 14) Bateman, E., Hohf, J. P. and Stamm, A. J. (1939) Ind. and Eng Chem. 31
- 15) Voigt, H., O, Krischer und H. Schauss (1940) Holz als Roh-und Werkstoff 3 : 10
- 16) Schliiter, R. und F. Fessel (1939) Holz als Roh-und Werkstoff 2 : 5
- 17) Stamm, A (1946) U. S. Agric. Techn Bull. 929
- 18) 小倉武夫 (1949) 林業試験場研究報告 42
- 19) Kollmann, F (1936) 前出
- 20) 満久崇麿 (1949) 木材研究 3